

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Kondenzátor pro jadernou elektrárnu VVER 1200
Condenser for Nuclear Power Plant VVER 1200

Student:
Vedoucí diplomové práce:

Ostrava 2010

Bc. Petr Winkler
prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Winkler**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **2302T006 Energetické stroje a zařízení**
Téma: **Kondenzátor pro jadernou elektrárnu VVER 1200**
Condenser for Nuclear Power Plant VVER 1200

Zásady pro vypracování:

Pro parní turbínu jaderné elektrárny o výkonu 1200 MWe nové generace III+ navrhnete dvoustupňový kondenzátor a parametry:

množství páry:	6410 t/hod
vstupní tlak páry do kondenzátoru:	0,0035 MPa
suchost páry	$x = 0,91$
teplota chladičí vody na vstupu	20 °C
poměrné množství chladičí vody k množství kondenzované páry	90-95
poměrné množství páry do kondenzace	$x_k = 0,54$

Se strojem má čtyři nízkotlaké díly. Vypočítejte hlavní rozměry kondenzátoru a doložte je tepelným výpočtem. Proveďte hydraulický výpočet a kontrolu pevnosti trubek.

Navrhnete celkovou dispozici kondenzátoru a dispozici vnitřního uspořádání trubek.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. RĚDR, M., PŘÍHODA, M. *Základy tepelné techniky*. Praha: SNTL, 1991.
ISBN 80-03-00366-0
2. SADIK KAKAC. *Boilers, evaporators, condensers*. John Wiley, USA, New York 1991.
CIP 90-22486 v knihovně VŠB.
3. Simulační program jaderné elektrárny Temelín-primární okruh. ČEZ Praha, 2000.
4. BEČVÁŘ, J. a kol. *Jaderné elektrárny*. SNTL Praha, 1989. Celostátní vysokoškolská učebnice.
5. DUBŠEK, F. *Jaderná energetika*. PC-DIK Brno, 1994, ISBN 80-214-0833-2.

Formální náležitosti a rozsah **diplomové práce** stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010



prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.
vedoucí katedry





prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou (bakalářskou) práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové (bakalářské) práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....

.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Adresa trvalého pobytu autora práce:

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

WINKLER, P. Kondenzátor pro jadernou elektrárnu VVER1200. Ostrava: katedra energetiky, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2010, 43 s. Diplomová práce, vedoucí Kolat, P.

Diplomová práce se zabývá návrhem dvoustupňového kondenzátoru pro jadernou elektrárnu VVER1200. V úvodu je základní popis samotné technologie. Následuje předběžný tepelný výpočet. Který je posléze upřesněn a doplněn o výpočet hlavních rozměrů, hydraulický výpočet a pevnostní kontrolu trubek. Také je navrhnutá celková dispozice kondenzátoru.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

WINKLER, P. Condenser for Nuclear Power Plant VVER1200. Ostrava: Department of Energy Engineering, Faculty of Mechanical Engineering VŠB-Technical University of Ostrava, 2010, 43 p. Thesis, head: Kolat, P.

This thesis is about design of two-stages Steam Condenser for the Nuclear Power Plant VVER1200. The introduction describes the technology itself. Next is basic thermal calculation. It is followed by specified thermal calculation with calculation of dimension, hydraulic and stress control tubes. At the end of this thesis are solutions of construction Steam Condenser.

Obsah

	Strana
Seznam použitých značek a symbolů	8
1 Úvod	10
2 Téma diplomové práce a její řešení	11
3 Tepelný výpočet	15
3.1 Předběžný tepelný výpočet	15
3.2 Upřesněný výpočet kondenzačních teplot.....	30
4 celkové dispoziční uspořádání.....	34
5 Hydraulický výpočet	38
6 Pevnostní výpočet	40
7 Závěr	42
8 Seznam použité literatury	43

PŘEHLED POUŽITÝCH SYMBOLŮ A INDEXŮ

Symbol	Jednotka	Veličina
x	-	suchost páry
xk	-	poměrné množství páry do kondenzace
p	MPa	vstupní tlak páry do kondenzátoru
t_{sp}	$^{\circ}C$	teplota syté páry
$l_{2,3}$	$kJ \cdot kg^{-1}$	měrné výparné teplo
v'	$m^3 \cdot kg^{-1}$	měrný objem vody
v''	$m^3 \cdot kg^{-1}$	měrný objem syté páry
$i' (H')$	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie vody
$i'' (H'')$	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie syté páry
\dot{m}_p	$t \cdot h^{-1}$	množství páry
\dot{m}_{pk}	$t \cdot h^{-1}$	množství páry vstupující do kondenzace
\dot{m}_{pk1}	$t \cdot h^{-1}$	množství páry připadající na jeden vstup kondenzátoru
\dot{m}_{pks}	$t \cdot h^{-1}$	množství páry připadající na jeden stupeň kondenzátoru
\dot{m}_v	$t \cdot h^{-1}$	množství chladicí vody
t_{v1}	$^{\circ}C$	teplota chladicí vody na vstupu
Q	W	tepelný výkon
i_x	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie páry o dané suchosti
c_p	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku
t	$^{\circ}C$	teplota
t_k	$^{\circ}C$	kondenzační teplota
F	N	síla
\dot{Q}	W	tepelný tok
\dot{m}	$kg \cdot s^{-1}$	hmotnostní průtok
c_p	$^{\circ}C$	měrná tepelná kapacita
I		první stupeň
II		druhý stupeň
q	$N \cdot m^{-1}$	spojité zatížení rovnoměrné
Δ	-	diference
d	m	průměr
r	m	poloměr
Re	-	Reynoldsovo číslo
Nu	-	Nusseltovo číslo
Pr	-	Prandtlovo číslo
S	m^2	povrch
ρ	$kg \cdot m^{-3}$	hustota

Symbol	Jednotka	Veličina
ν	$m^2 \cdot s^{-1}$	kinematická viskozita
π	-	Ludolfovo číslo
α	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	součinitel přestupu tepla
λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti
g	$m \cdot s^{-2}$	tíhové zrychlení

1. Úvod

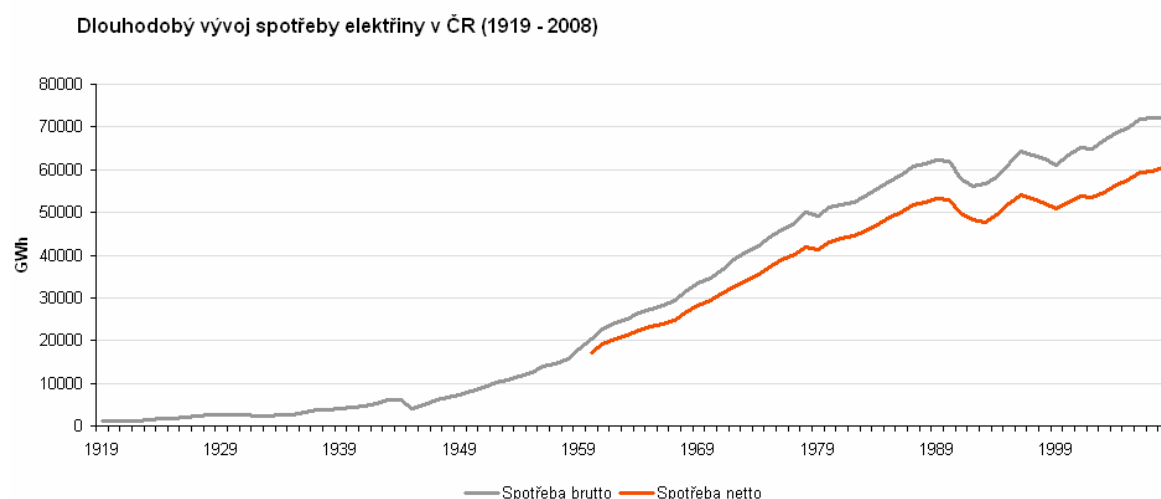
Perspektivy jaderné energetiky

Jaderná energetika má za sebou více jak půlstoletí historie výroby elektrické energie. Když byl 27. června 1954 k rozvodné síti oficiálně připojen první jaderný reaktor na světě, ve městě Obninsk v tehdejším Sovětském svazu, málokdo asi předpokládal tak proměnlivý postoj veřejnosti k tomuto odvětví energetiky. V 5-ti MW reaktoru byl použit grafit jako moderátor a voda jako chladicí médium, následný vývoj byl velice dynamický a většina rozvinutých států se chopila nového civilního využití jaderné energie s velkými ambicemi.

Jedním z těchto států bylo také Československo, které postavilo Jadernou elektrárnu Jaslovské Bohunice (dnes území Slovenské republiky), Jadernou elektrárnu Dukovany (dnes území České republiky) a v plánech byly souběžně Jaderná elektrárna Temelín (dnes území České republiky) a stavba Jaderné elektrárny Mochovce (území dnešní Slovenské republiky). Jaderná energetika byla nedílnou součástí energetického mixu, do budoucna bylo počítáno s ambiciózním využitím jaderných zdrojů a předpokládala se stavba dalších výrobních kapacit.

Po černobylské havárii a ekonomicko-politických změnách nastala velká změna ve společenské poptávce po energii z jaderných zdrojů, a tak ani rozestavěná Jaderná elektrárna Temelín nebyla realizována v původní velikosti čtyř bloků, ale pouze se dvěma tlakovodními reaktory VVER 1000 typu V 320.

Po více jak třiceti letech od vydání investičního záměru na nejnovější českou Jadernou elektrárnu Temelín se opět společnost nachází u rozhodnutí, jak pokrýt neustále se zvětšující spotřebu energie. Po dvacetiletém odklonu od jaderné energetiky se opět jeví tato varianta jako jedna z velmi perspektivních cest k energetické soběstačnosti. Jak se uvádí ve státní energetické koncepci České republiky z roku 2009, tak bez jaderné energetiky by bylo velmi obtížné zabezpečit dostatečné množství energie pro blahodárný rozvoj společnosti.



Obr.1 [1]

Jak je patrné z vývoje spotřeby elektrické energie v České republice na obr.1, současné zdroje již brzy nebudou schopny pokrýt spotřebu. Je tedy nezbytné již nyní hledat cesty,

jak se vyhnout drahým dovozům energie ze zahraničí, přičemž si ani nemůžeme, s ohledem na situaci okolních států, být jisti, že bude odkud dovážet.

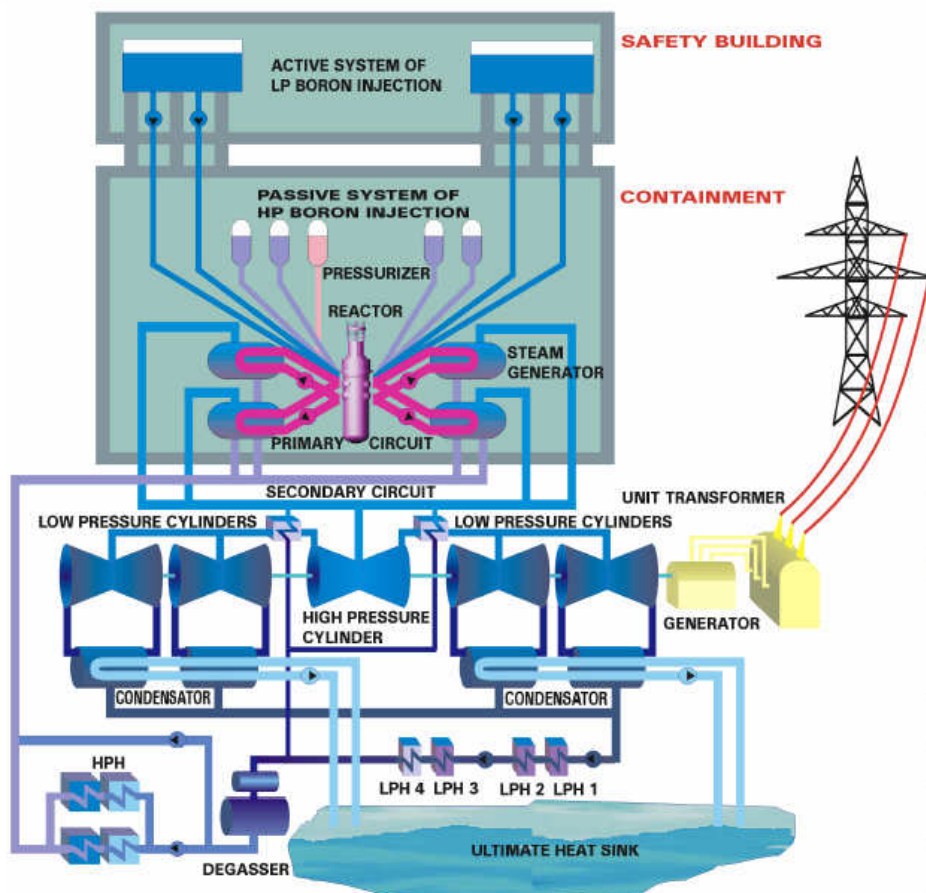
Rozhodnutí o „dostavbě“ Jaderné elektrárny Temelín se v souvislostech s vývojem posledních let ve světě jeví jako smysluplné a logické řešení, které zajistí nový moderní zdroj čisté energie šetrné k životnímu prostředí.

Tudíž jsme v situaci, kdy se hledá nejvhodnější dodavatel a technologie pro dostavbu této největší elektrárny v České republice. V užším výběru jsou pod označením AES-2006 (nyní MIR-1200) projekt odvozený od reaktorů typu VVER 1000, jehož dva bloky jsou v současnosti provozovány v elektrárně Temelín. Jde o projekt tlakovodního reaktoru od firem Atomstroyexport a Hidropress. Dále Areva EPR™, kde se jedná o projekt tlakovodního reaktoru od firmy AREVA jako vylepšení reaktorů N4 a Konvoi. Tyto reaktory jsou provozovány v současnosti v Německu a ve Francii. S Areva EPR™ počítá francouzská energetická společnost EDF, při celkové obnově svých jaderných elektráren. A Westinghouse AP1000™ projekt AP1000 vycházející z technologií ověřených 50 lety provozu mnoha desítek tlakovodních reaktorů firmy Westinghouse.

2. Téma diplomové práce a její řešení

GENERAL DESCRIPTION OF THE VVER-1200/491 NUCLEAR POWER PLANT

The power unit consists of a reactor plant with a pressurized water reactor and turbine plant. A two-circuit thermal diagram is presented below.



Obcný popis jaderné elektrárny VVER-1200/491

Obr.2 [2]

Koncepce řešeného soustrojí VVER 1200 je na obr. 2, která je také v užším výběru pro dva připravované reaktory v Jaderné elektrárně Temelín pod označením AES-2006 (nyní MIR-1200).

Tato alternativa je zadáním diplomové práce, kde je řešen návrh dvoustupňového kondenzátoru pro parní turbínu jaderné elektrárny o výkonu 1200 MW. Turbína má dva výstupy z vysokotlaké části a na každém tomto výstupu jsou dva nízkotlaké díly turbíny. Každý nízkotlaký díl má dva výstupy páry do kondenzátoru.

Vystupující pára z každého nízkotlakého dílu vstupuje do jiného stupně kondenzátoru, který je dvoustupňový. Jeden stupeň kondenzátoru má dva vstupy páry. Tento dvoustupňový kondenzátor je navrhován v rámci diplomové práce. Oba stupně kondenzátoru mají shodnou velikost teplosměnné plochy, která je tvořena povrchem trubek. Kondenzační teplota se různí v každém stupni.

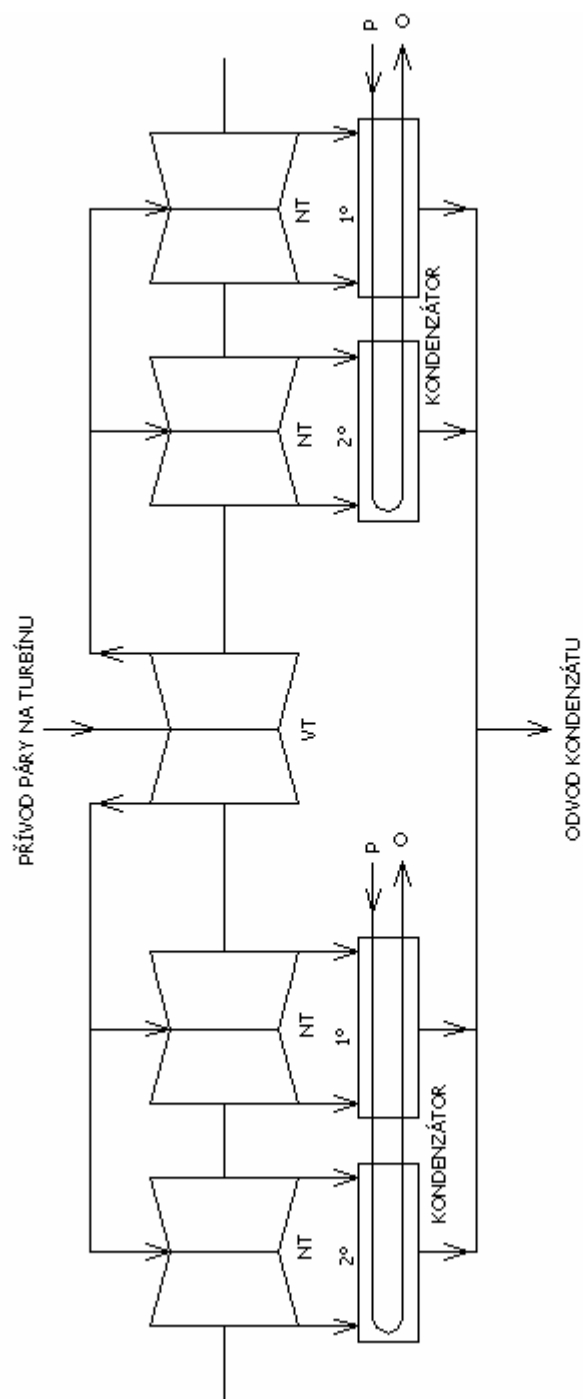
Schéma ústrojí je znázorněné na obr. 3

Je proveden základní tepelný výpočet, který určí rozměry kondenzátoru a z upřesněného výpočtu je následně provedena kontrola základních parametrů (kondenzační teplota, teplota chladicí vody).

Zadáním práce je i provedení hydraulického výpočtu a pevnostní kontroly trubek.

Dispoziční uspořádání kondenzátoru je ovlivněno konstrukčními možnostmi a zvyklostmi, které se osvědčily.

Při vlastním návrhu byla užita odborná literatura a konzultace odborných pracovníků VŠB-TUO KE a pracovníků tepelné elektrárny Dětmarovice.



P - PŘÍVOD CHLADÍCÍ VODY
O - ODVOD CHLADÍCÍ VODY

Zjednodušené schém a soustrojí

obr. 3

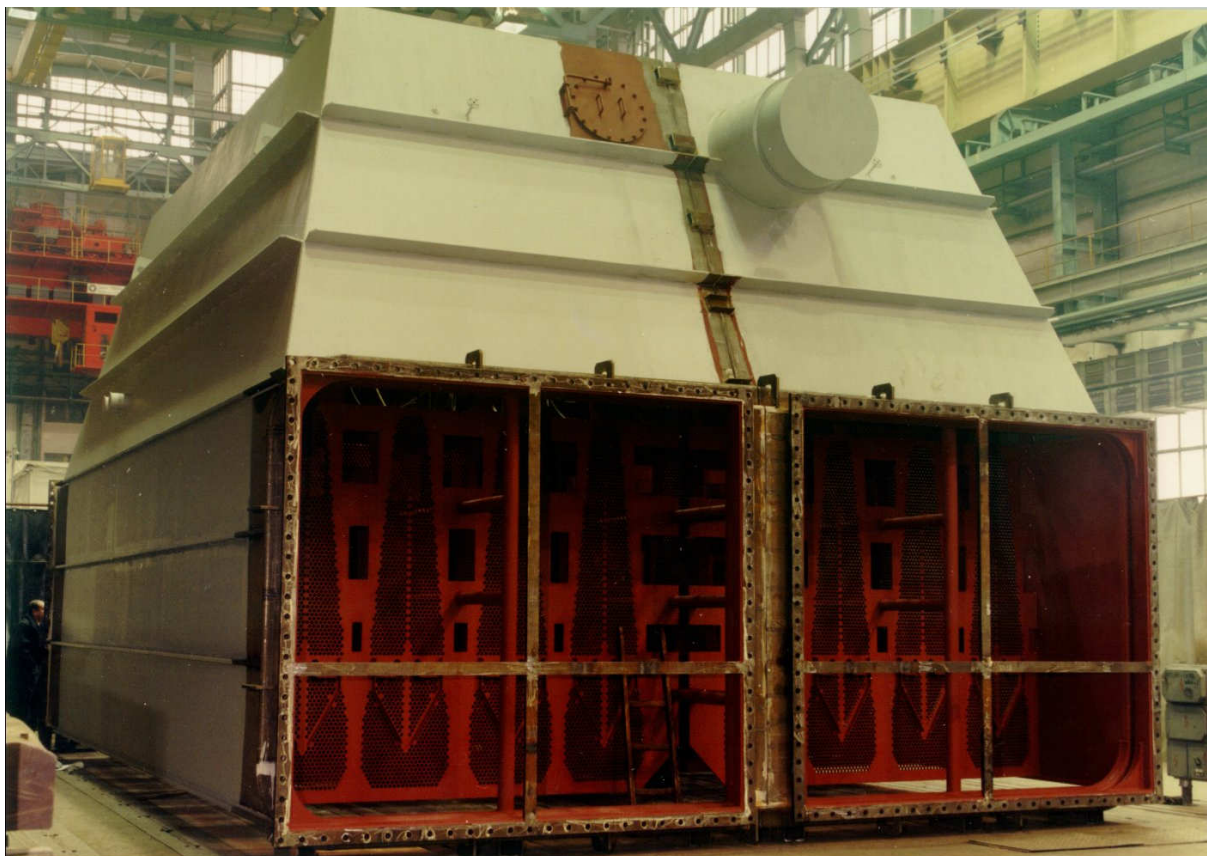
Kondenzátor

Kondenzátor (parní kondenzátor) je zařízení, které v tepelném oběhu slouží k odvodu tepla za změny skupenství pracovní látky.

Pára vstupující z turbíny do kondenzátoru předává teplo chladicí vodě a kondenzuje. Kondenzující pára předává část tepla chladicí vodě nepřímo prostřednictvím teplosměnné plochy. Kondenzace páry se uskutečňuje za konstantní teploty, zanedbáváme-li vliv poklesu tlaku při průchodu páry tělesem kondenzátoru (mezi trubkami) vlivem hydraulických odporů a vliv přítomnosti vzduchu, jehož poměrný obsah v nezkondenzované páře se stále zvětšuje s přibýváním kapalné fáze.

Teplosměnná plocha povrchového kondenzátoru je tvořena systémem trubek, které jsou uspořádány do svazků. Těmito trubkami proudí chladicí voda.

Povrchové kondenzátory se podle počtu tahů dělí na jednotahové nebo vícetahové, mohou být dělené a nedělené z vodní strany za účelem čištění za provozu.



Povrchový kondenzátor pro turbínu ŠKODA 60 MW
Obr.4 [3]

Konstrukce kondenzátoru

Plášť kondenzátoru je svařen z ocelových plechů. Tvar se u velkých aplikací nevolí válcový, ale obdélníkový, z důvodu účelnosti využití prostoru pod turbínou. Výstupní hrdlo turbíny je přímo spojeno se vstupním hrdlem kondenzátoru přírubovým spojem nebo přivařením. Uložení je provedeno na pružinách, které zachycují hmotnost samotného kondenzátoru a část hmotnosti vodního obsahu.

Vodní prostor od parního je oddělen přes trubkovnice a stěny trubek. Trubky jsou do trubkovnice zaválcovány viz. obr.5. Trubkovnice se obvykle u kondenzátorů, které nepracují v agresivním prostředí, dělají ocelové a svařují se.

Vodní komory by měly zajistit rovnoměrné přivedení vody do všech trubek nezávisle na jejich umístění.

Kondenzát je zachytáván do sběrače kondenzátu a kondenzačním čerpadlem dopravován zpět do napájecí nádrže.

Nez kondenzovatelné plyny jsou odsávány vývěvou při snaze zamezení odsátí páry.

Kondenzátorové (chladicí) trubky mají obvykle vnější průměr 18-30 mm. Tloušťka stěny se pohybuje 1-1,5 mm.

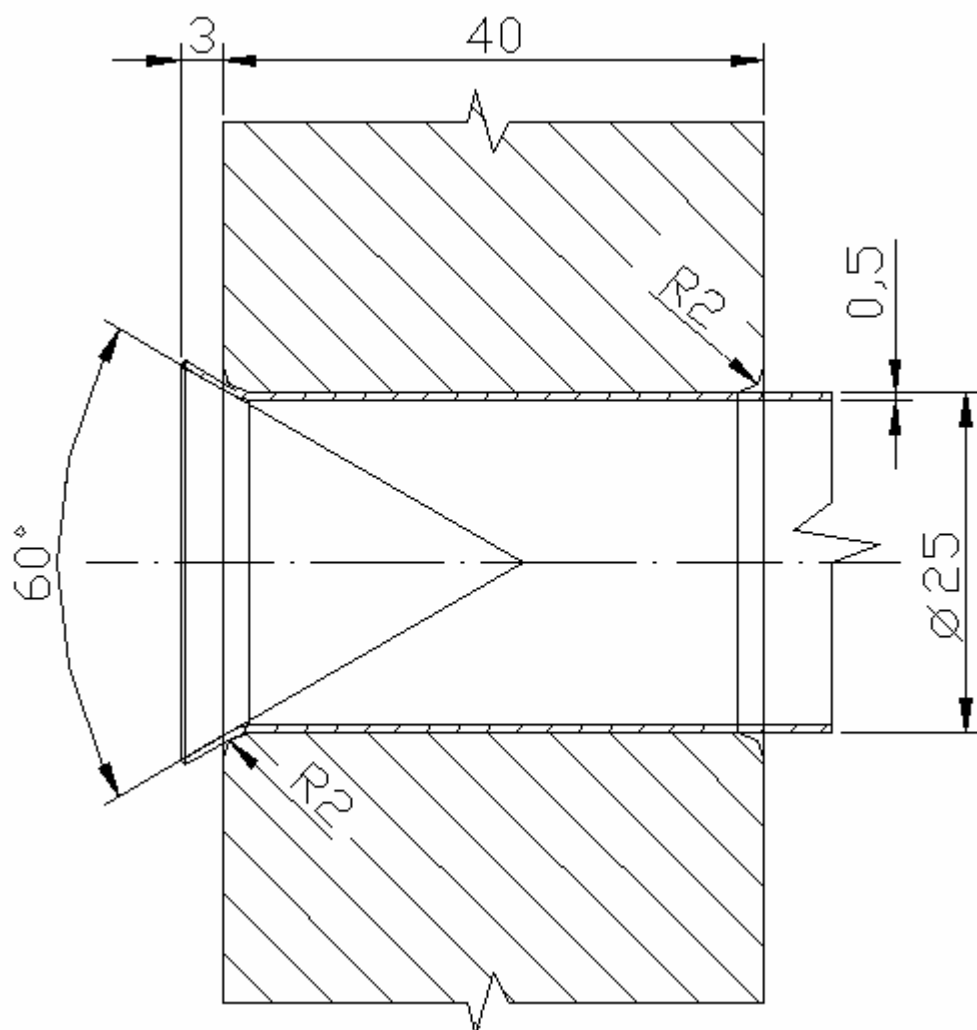
Rychlost proudění chladicí vody se doporučuje větší než $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ z důvodu nižšího zanášení.

Materiál trubek musí mít dobrou tepelnou vodivost, odolnost proti korozi a tvařitelnost na zaválcování konců do trubkovnice.

3. Tepelný výpočet kondenzátoru

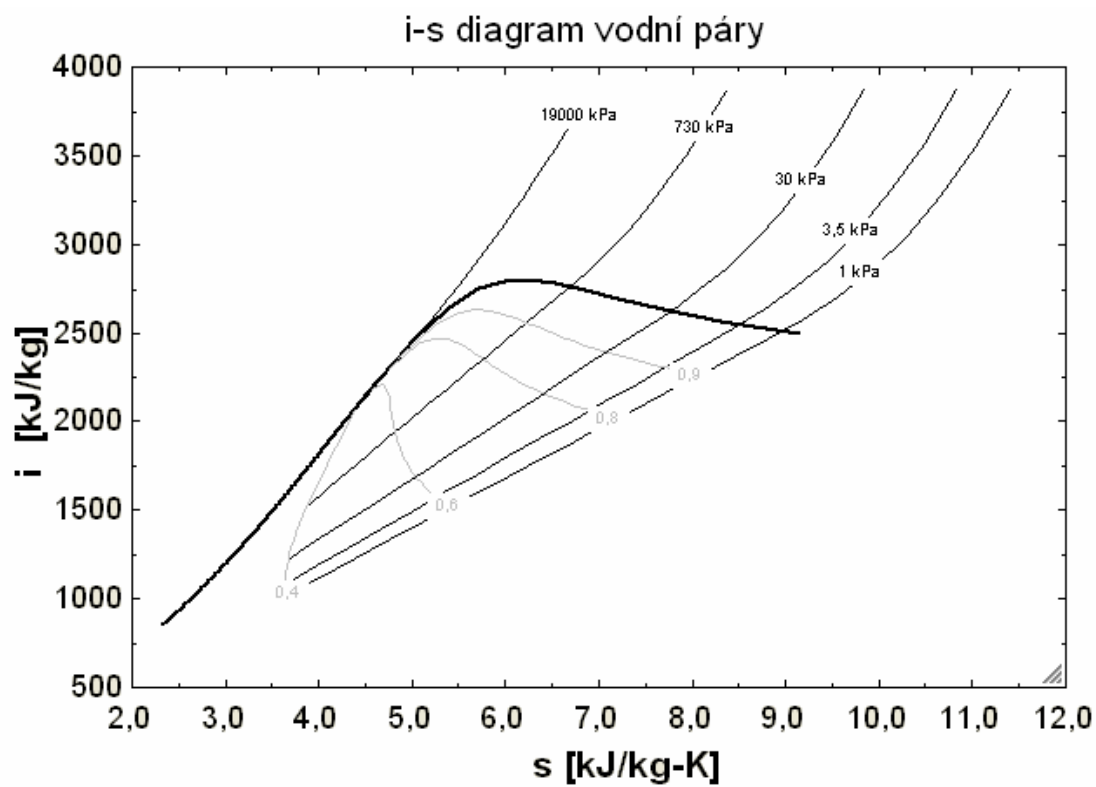
3.1 Předběžný tepelný výpočet

Vstupní parametr	Hodnota	Jednotka
množství páry	6410	$t \cdot h^{-1}$
vstupní tlak páry	0,0035	Mpa
suchost páry	0,91	-
teplota chladicí vody na vstupu	20	°C
poměrné množství chladicí vody k množství kondenzované páry	90-95	-
poměrné množství páry do kondenzace	0,54	-

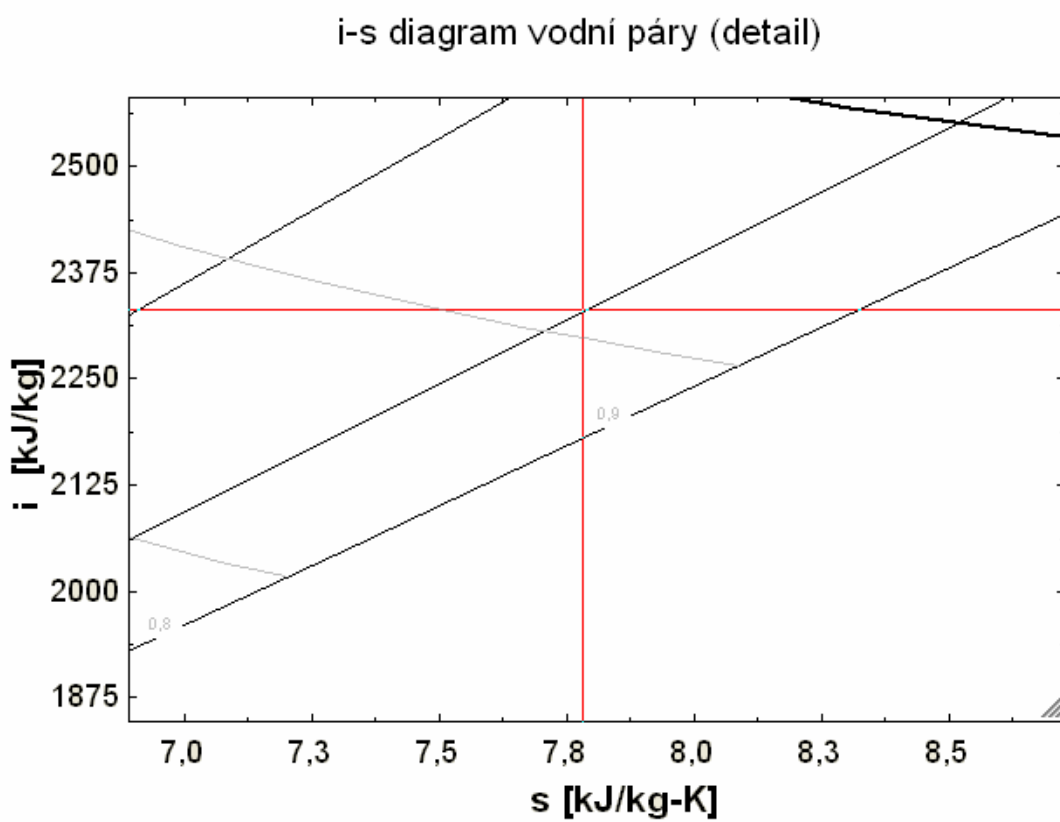


Detail zaválcování teplosměnných trubek do trubkovnice
Obr 5

Parametry syté páry pro tlak $p = 0,0035 \text{ MPa}$ o suchosti $x = 0,91$



Obr. 6



Obr.7

Vstupní parametry páry do kondenzace

$$p = 0,0035 \text{ MPa}$$

$$x = 0,91$$

Odečtené hodnoty:

$$\begin{array}{lll} t_{sp} = 26,715 \text{ } ^\circ\text{C} & v' = 0,0010035 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} & (H') i' = 111,925 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \\ l_{2,3} = 2438 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} & v'' = 39,317 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} & (H'') i'' = 2550 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \end{array}$$

Množství páry vstupující do kondenzace:

$$\dot{m}_{pk} = xk \cdot \dot{m}_p \quad (1)$$

$$\dot{m}_{pk} = 0,54 \cdot 6410$$

$$\dot{m}_{pk} = 3461,4 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} \Rightarrow \dot{m}_{pk} = 961,5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Turbína jaderné elektrárny o výkonu 1200 MWe nové generace III+ má čtyři nízkotlaké části. Z každé této části jsou dva vývody do kondenzátoru. Tedy soustrojí obsahuje dva dvoustupňové kondenzátory.

Každý stupeň kondenzátoru má dva vstupy páry, do kondenzátoru jsou tedy čtyři vstupy páry, každým z nich vstupuje množství páry:

$$\dot{m}_{pk1} = \frac{\dot{m}_{pk}}{4} = \frac{3461,4}{4} = 865,35 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} \Rightarrow \dot{m}_{pk1} = 240,375 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2)$$

Do jednoho stupně kondenzátoru vstupuje:

$$\dot{m}_{pks} = 2 \cdot \dot{m}_{pk1} = 2 \cdot 865,35 = 1730,7 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} \Rightarrow \dot{m}_{pks} = 480,75 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3)$$

Dle vstupních hodnot připadá na zkondenzování 1 kg páry 90-95ti násobek množství vody.
 \Rightarrow 92,5 střední hodnota použita pro výpočet potřebného množství chladicí vody.

Na jeden stupeň kondenzátoru připadá množství páry $\dot{m}_{pks} = 480,75 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

\Rightarrow potřebné množství chladicí vody

$$\dot{m}_v = 92,5 \cdot \dot{m}_{pks} = 92,5 \cdot 1730,7 = 160089,75 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} \Rightarrow \dot{m}_v = 44469,375 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4)$$

Teplota chladicí vody na vstupu $t_{v1} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Návrh průběhu teplot v kondenzátoru

Párou předané teplo v kondenzátoru

$$Q = (i_x - c_p \cdot t_{sp}) \cdot \dot{m}_{pk} \text{ W} \quad (5)$$

i_x odečteno z obr.7 (výpočet proveden v EES)

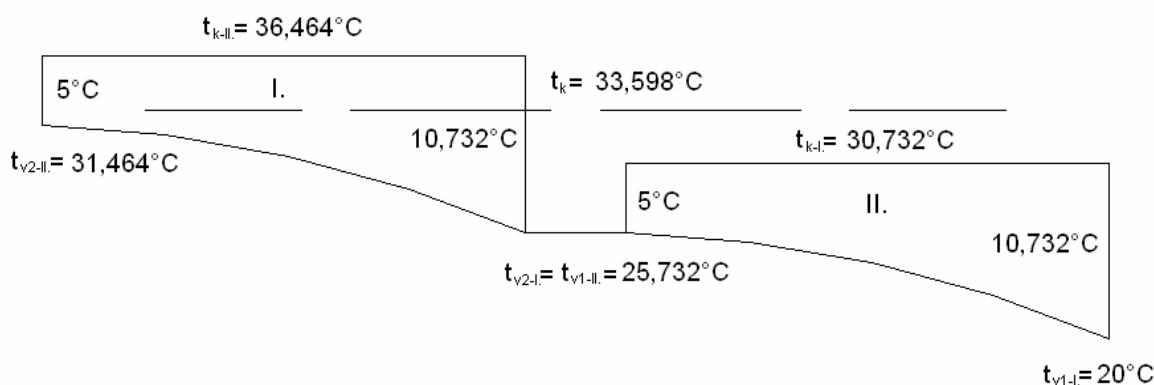
$$Q = (2330,8 - 4,186 \cdot 26,715) \cdot 3461,4 = 2,134 \cdot 10^6 \text{ kW}$$

Výpočet rozdílu teplot vody na vstupu a výstupu kondenzátoru

$$\Delta t = \frac{Q}{\dot{m}_v \cdot c_p} = \frac{2,1515 \cdot 10^5}{44469,375 \cdot 4,186} = 11,464 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6)$$

Ohřev vody připadající na jeden stupeň kondenzátoru

$$\Delta t_{st} = \frac{\Delta t}{2} = \frac{11,464}{2} = 5,732 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7)$$



Návrh průběhu teplot v kondenzátoru
Obr.8

Dvoustupňové kondenzátory se navrhují pro střední kondenzační teplotu t_k odpovídající

teplotě páry vstupující do kondenzátoru $t_k = \frac{t_{k-I} + t_{k-II}}{2}$ [4].

Střední kondenzační teplota

$$t_k = \frac{t_{k-I} + t_{k-II}}{2} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8)$$

Vstupní teplota chladící vody $t_{v1-I} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Jak je patrné z obr.8, tak t_k je mnohem vyšší, než-li t_{sp} . Z rovnice (8) vyplývá, že nejsnadnější je snížit vstupní teplotu chladící vody t_{v1-I} .

delta tST **5,68**

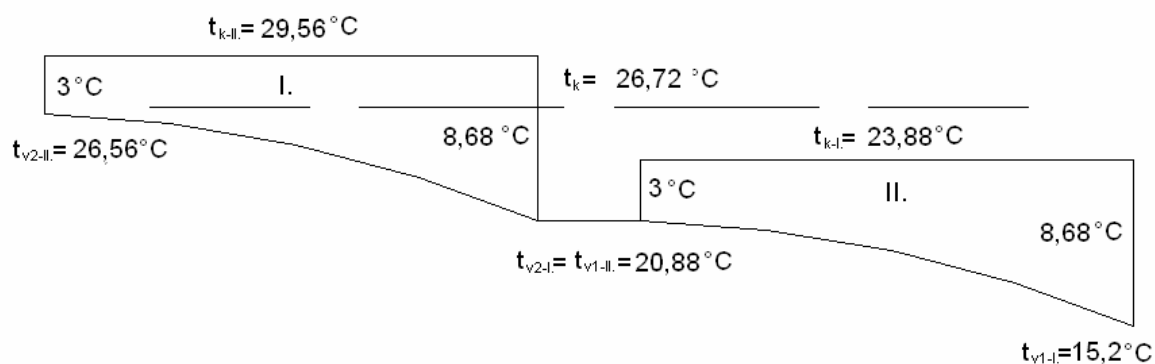
teplotní spád **3**

Tv1-I.	tv1-II.(tv2-I.)	tv2-II.	tkI.	tkII.	tk	r velky
15	20,68	26,36	23,68	29,36	26,52	8,68
15,1	20,78	26,46	23,78	29,46	26,62	8,68
15,2	20,88	26,56	23,88	29,56	26,72	8,68
15,3	20,98	26,66	23,98	29,66	26,82	8,68
15,4	21,08	26,76	24,08	29,76	26,92	8,68
15,5	21,18	26,86	24,18	29,86	27,02	8,68
15,6	21,28	26,96	24,28	29,96	27,12	8,68
15,7	21,38	27,06	24,38	30,06	27,22	8,68
15,8	21,48	27,16	24,48	30,16	27,32	8,68
15,9	21,58	27,26	24,58	30,26	27,42	8,68
16	21,68	27,36	24,68	30,36	27,52	8,68
16,1	21,78	27,46	24,78	30,46	27,62	8,68
16,2	21,88	27,56	24,88	30,56	27,72	8,68
16,3	21,98	27,66	24,98	30,66	27,82	8,68
16,4	22,08	27,76	25,08	30,76	27,92	8,68
16,5	22,18	27,86	25,18	30,86	28,02	8,68
16,6	22,28	27,96	25,28	30,96	28,12	8,68
16,7	22,38	28,06	25,38	31,06	28,22	8,68
16,8	22,48	28,16	25,48	31,16	28,32	8,68
16,9	22,58	28,26	25,58	31,26	28,42	8,68
17	22,68	28,36	25,68	31,36	28,52	8,68

Optimalizace vstupní teploty chladicí vody $t_{v1-I.}$

Obr. 9

Z přepočítání hodnot byla určena výsledná vstupní teplota chladicí vody $t_{v1-I.} = 15,2 \text{ } ^\circ\text{C}$



Skutečný průběhu teplot v kondenzátoru

Obr.10

Kde t_k již odpovídá t_{sp} .

$$t_k = 26,72 \cong t_{sp} = 26,715 \Rightarrow \text{splnění konstrukční podmínky.}$$

Součinitel přestupu tepla na straně vody

Výpočet je pro trubku z titanu o rozměrech 25 x 0,5 mm. Rychlost vody v trubkách w je stanovena na $w = 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

1. stupeň

$$t_{SV-I} = \frac{t_{vI-I} + t_{vI-II}}{2} = \frac{15,2 + 20,88}{2} = 18,04 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (9)$$

Hodnoty fyzikálních konstant odečteny z tabulek pro teplotu t_{SV-I} .

Fyzikální konstanta	Hodnota	Jednotka
ν_I	$1,08 \cdot 10^{-6}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
λ_I	0,594	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
ρ_I	998,68	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
c_{pI}	$4,187 \cdot 10^3$	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Reynoldsovo číslo

$$\text{Re}_I = \frac{w \cdot d_1}{\nu_I} \quad (10)$$

$$\text{Re}_I = \frac{2,5 \cdot 0,024}{1,08 \cdot 10^{-6}} = 55556$$

$$\text{Re}_I = 55556 \Rightarrow \text{turbulentní proudění}$$

Prandtlovo číslo

$$\text{Pr}_I = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu_I \cdot c_{pI} \cdot \rho_I}{\lambda_I} = \frac{1,08 \cdot 10^{-6} \cdot 4,187 \cdot 10^3 \cdot 998,68}{0,594} = 7,603 \quad (11)$$

Nusseltovo kritérium (pro turbulentní proudění trubkou)

$$\text{Nu}_I = 0,021 \cdot \text{Re}_I^{0,8} \cdot \text{Pr}_I^{0,43} = 0,021 \cdot 55556^{0,8} \cdot 7,603^{0,43} = 313,926 \quad (12)$$

Součinitel přestupu tepla na straně vody

$$\alpha_{vI} = \frac{\text{Nu}_I \cdot \lambda_I}{d_i} = \frac{313,926 \cdot 0,594}{0,024} = 7769,669 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (13)$$

2. stupeň

$$t_{SV-II} = \frac{t_{v2-I.} + t_{v2-II.}}{2} = \frac{20,88 + 26,56}{2} = 23,72 \text{ } ^\circ C \quad (14)$$

Hodnoty fyzikálních konstant odečteny z tabulek pro teplotu t_{SV}

Fyzikální konstanta	Hodnota	Jednotka
ν_{II}	$0,896 \cdot 10^{-6}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
λ_{II}	0,605	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
ρ_{II}	997,38	$kg \cdot m^{-3}$
c_{pII}	$4,179 \cdot 10^3$	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

Reynoldsovo číslo

$$Re_{II} = \frac{w \cdot d_1}{\nu_{II}} \quad (15)$$

$$Re_1 = \frac{2,5 \cdot 0,024}{0,896 \cdot 10^{-6}} = 66964$$

$Re_1 = 66964 \Rightarrow$ turbulentní proudění

Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu_{II} \cdot c_{pII} \cdot \rho_{II}}{\lambda_{II}} = \frac{0,896 \cdot 10^{-6} \cdot 4,179 \cdot 10^3 \cdot 997,38}{0,605} = 6,173 \quad (16)$$

Nusseltovo kritérium (pro turbulentní proudění trubkou)

$$Nu_{II} = 0,021 \cdot Re_{II}^{0,8} \cdot Pr_{II}^{0,43} = 0,021 \cdot 66964^{0,8} \cdot 6,173^{0,43} = 333,277 \quad (17)$$

Součinitel přestupu tepla na straně vody

$$\alpha_{vII} = \frac{Nu_{II} \cdot \lambda_{II}}{d_i} = \frac{333,277 \cdot 0,605}{0,024} = 8401,358 \text{ } W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (18)$$

Součinitel přestupu tepla na straně páry

Pomocné hodnoty pro výpočet součinitele přestupu tepla při kondenzaci vodní páry.

t	p	$\sqrt[4]{1_{23}}$	$\sqrt[4]{\frac{\rho^2 \cdot \lambda^3}{\eta}}$
$^{\circ}\text{C}$	kPa	$(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})^{\frac{1}{4}}$	$(\text{J}^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-8} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-3})^{\frac{1}{4}}$
0	0,6108	7,05	983,73
20	2,337	7,02	1203,24
40	7,375	7,007	1390,23
60	19,917	6,978	1552,83
80	47,36	6,935	1682,91
100	101,31	6,892	1788,6
120	198,54	6,864	1869,9
140	361,4	6,807	1926,81
160	618	6,764	1951,2
180	1002,7	6,692	1967,46
200	1555,1	6,635	1975,59
220	2320,1	6,578	1959,33
240	3348	6,464	1951,2
260	4694	6,378	1869,9
280	6419	6,263	1796,73
300	8592	6,106	1707,3
320	11290	5,901	1585,35
340	14608	5,648	1414,62
360	18678	5,177	1170,72

Tab.1 [5]

Výpočet součinitele přestupu tepla na vnější straně trubek

$$Nu = C \cdot (Ga \cdot Pr \cdot K)^n \quad (19)$$

$$Ga \text{ galileovo kritérium, } Ga = \frac{g \cdot d_2}{\nu^2} \quad (20)$$

$$K \text{ kritérium fázové přeměny pro kondenzaci, } K = \frac{1_{23}}{c_p \cdot \Delta t} \quad (21)$$

Δt rozdíl mezi teplotou kondenzátu a teplotou povrchu trubky

C konstanta pro vodorovné trubky, $C = 0,72$

n exponent pro vodorovné trubky, $n = \frac{1}{4}$

Pro praktické účely je vhodné vzorec upravit [4]

$$\alpha_p = C \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho^2 \cdot \lambda^3}{\eta}} \cdot \frac{\sqrt[4]{1_{23}}}{\sqrt[4]{x \cdot (t_k - t_m)}} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (22)$$

$$\sqrt[4]{\frac{\rho^2 \cdot \lambda^3}{\eta}} \text{ odpovídá } t_{ST\ddot{R}} = 0,5 \cdot (t_s + t_{SV})$$

$\sqrt[4]{l_{23}}$ je určena teplotou syté páry t_s .

Hodnoty $\sqrt[4]{\frac{\rho^2 \cdot \lambda^3}{\eta}}$ a $\sqrt[4]{l_{23}}$ jsou uvedeny v Tab.1 .

$$x = d_2$$

I. stupeň

Pro teplotu kondenzující páry $t_{k-I.} = 23,88 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\sqrt[4]{\frac{\rho^2 \cdot \lambda^3}{\eta}} = 1300,58 \text{ } J^3 \cdot kg \cdot m^{-8} \cdot s^{-2} \cdot K^{-3}$$

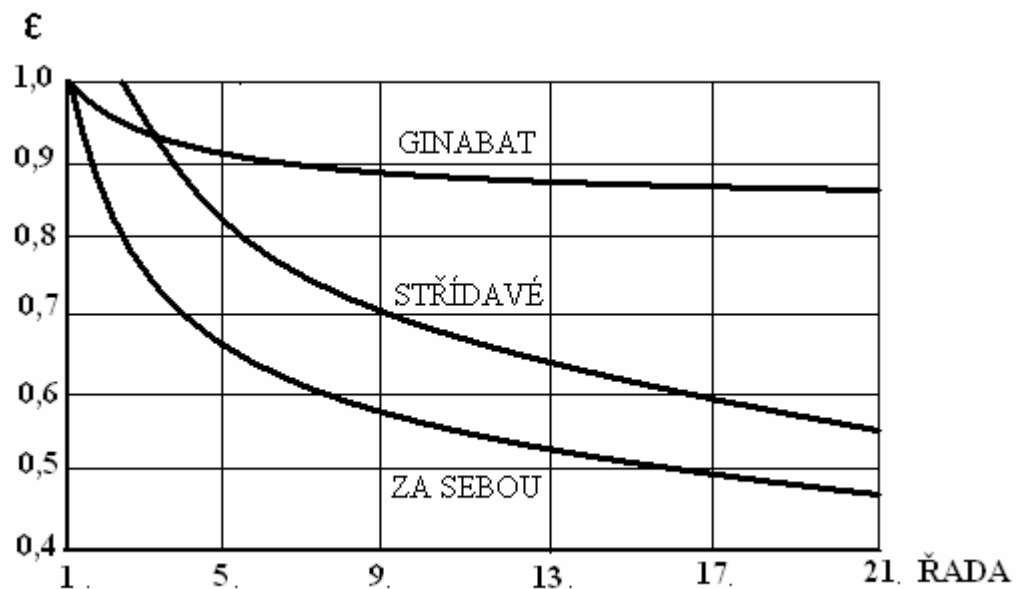
$$\sqrt[4]{l_{23}} = 7,015 \text{ } (J \cdot kg^{-1})^{\frac{1}{4}}$$

$$\alpha_{pl} = C \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho^2 \cdot \lambda^3}{\eta}} \cdot \frac{\sqrt[4]{l_{23}}}{\sqrt[4]{x \cdot (t_k - t_m)}} = 0,72 \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho^2 \cdot \lambda^3}{\eta}} \cdot \frac{\sqrt[4]{l_{23}}}{\sqrt{d_2 \cdot (t_{k-I.} - t_{SV-I})}} \quad (23)$$

$$\alpha_{pl} = 0,72 \cdot 1300,58 \cdot \frac{7,015}{\sqrt[4]{0,025 \cdot (23,88 - 18,04)}} = 10626,96 \text{ } W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

α_p platí pro osamocenou trubku.

Jak je patrné z Obr.4., v kondenzátoru je velké množství trubek uspořádaných do svazků, kde jsou trubky v řadách (typy uspořádání jsou řešeny později), a tak každá řada má jinou hodnotu součinitele přestupu tepla. α_p je součinitel přestupu tepla pro první řadu, řada n má součinitel přestupu tepla $\alpha_{pn} = \varepsilon \cdot \alpha_p$, přičemž ε je korekční součinitel.



Závislosti korekčního součinitele na uspořádání a řadě
Obr.11 [5]

Uspořádání trubek v kondenzátoru bylo zvoleno jako střídavé. Trubky jsou ve 190 řadách nad sebou. Kondenzát je zachytáván svodným plechem pod 115. řadou. Toto uspořádání bylo zvoleno podle provedeného výpočtu a na základě realizace podobného kondenzátoru v Jaderné elektrárně Temelín.

Řada	ε	$\alpha_{pn} / W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
1.	1	9869
115.	0,3	2960
116.	1	9869
190.	0,4	3947,6

Tabulka hodnot přestupních součinitelů α_{pn} , ε [5]

Obr.12

Střední hodnota přestupního součinitele na straně páry $\alpha_{p,STR}$

$$\alpha_{p,STR} = \frac{\sum \alpha_{pn}}{n} = \frac{26645,6}{4} = 6661,4 \text{ W} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (24)$$

II. stupeň

Pro teplotu kondenzující páry $t_{k-II.} = 29,56 \text{ }^{\circ}C$

$$\sqrt[4]{\frac{\rho^2 \cdot \lambda^3}{\eta}} = 1300,8 \text{ J}^3 \cdot kg \cdot m^{-8} \cdot s^{-2} \cdot K^{-3}$$

$$\sqrt[4]{l_{23}} = 7,013 \text{ (J} \cdot \text{kg}^{-1})^{\frac{1}{4}}$$

$$\alpha_{pII} = C \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho^2 \cdot \lambda^3}{\eta}} \cdot \frac{\sqrt[4]{l_{23}}}{\sqrt[4]{x \cdot (t_k - t_m)}} = 0,72 \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho^2 \cdot \lambda^3}{\eta}} \cdot \frac{\sqrt[4]{l_{23}}}{\sqrt{d_2 \cdot (t_{k-II} - t_{SV-II})}} \quad (25)$$

$$\alpha_{pII} = 0,72 \cdot 1300,8 \cdot \frac{7,013}{\sqrt[4]{0,025 \cdot (29,56 - 23,72)}} = 10625,727 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Řada	ε	$\alpha_{pn} / \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
1.	1	10 296,5
115.	0,3	30 88,95
116.	1	10 296,5
190.	0,4	4 118,6

Tabulka hodnot přestupních součinitelů α_{pn} , ε [5]

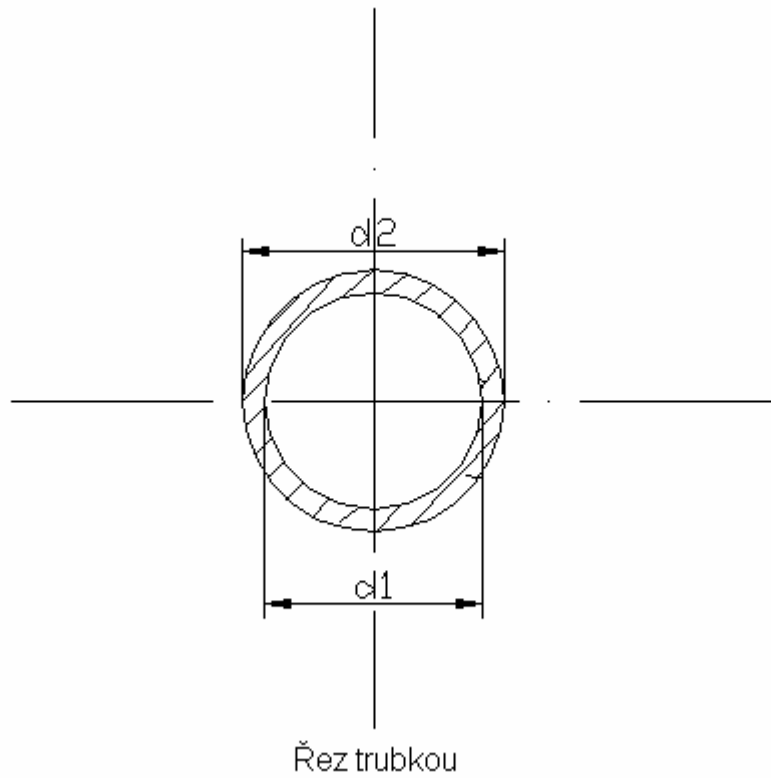
Obr.13

Střední hodnota přestupního součinitele na straně páry $\alpha_{p,STR}$

$$\alpha_{p,STR} = \frac{\sum \alpha_{pn}}{n} = \frac{27,800,55}{4} = 6950,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (26)$$

Určení součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_p} + \frac{d_2}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_2}{\alpha_v \cdot d_1}} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (27)$$



Obr.14

I. stupeň

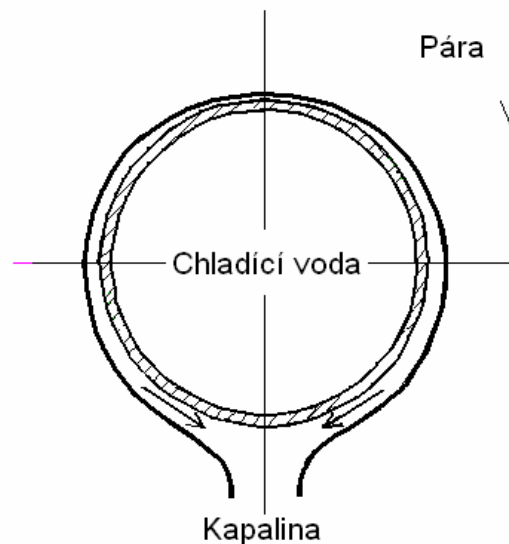
$$k_I = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_p} + \frac{d_2}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_2}{\alpha_v \cdot d_1}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{p,STR-I}} + \frac{d_2}{d_1} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_2}{\alpha_{vI} \cdot d_1}} \quad (28)$$

$$k_I = \frac{1}{\frac{1}{6661,4} + \frac{0,025}{2 \cdot 15} \cdot \ln \frac{0,025}{0,024} + \frac{0,025}{7769,669 \cdot 0,024}} = 3142,678 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

II. stupeň

$$k_{II} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_p} + \frac{d_2}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_2}{\alpha_v \cdot d_1}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{p,STR-II}} + \frac{d_2}{d_1} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_2}{\alpha_{vII} \cdot d_1}} \quad (29)$$

$$k_{II} = \frac{1}{\frac{1}{6950,1} + \frac{0,025}{2 \cdot 15} \cdot \ln \frac{0,025}{0,024} + \frac{0,025}{8401,358 \cdot 0,024}} = 3312,488 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$



Film kondenzátu pokrývající teplosměnnou trubku
Obr.15

Součinitel prostupu tepla a výpočet teplosměnné plochy

Součinitel prostupu tepla určen podle HEI (Heat Exchange Institute)
Standart HEI [6]

$$k = C_o \cdot \sqrt{w} \cdot C_{tv1} \cdot C_m \cdot C_\epsilon \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (30)$$

$$C_o = 2705 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad \text{pro trubky o průměru 22 až 25 mm}$$

w rychlost vody v trubkách

C_{tv1} korekce na vstupní teplotu chladicí vody

$$C_{tv1} = 1,42 \cdot 10^{-2} \cdot t_{v1-I} - 2,06 \cdot 10^{-3} \cdot (|t_{v1-I} - 18,5|)^{1,42} + 0,705 \quad (31)$$

C_m korekce na materiál trubky a tloušťku stěny \Rightarrow pro titan $C_m = 0,86$

C_ϵ korekce na čistotu trubek \Rightarrow při Taprogge $C_\epsilon = 1$

I. stupeň

$$k_I = C_o \cdot \sqrt{w} \cdot C_{tv1} \cdot C_m \cdot C_\epsilon \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

$$C_{tv1} = 1,42 \cdot 10^{-2} \cdot 18,04 - 2,06 \cdot 10^{-3} \cdot (|18,04 - 18,5|)^{1,42} + 0,705 = 0,96$$

$$k_I = 2705 \cdot \sqrt{2,5} \cdot 0,96 \cdot 0,86 \cdot 1 = 3531,075 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (32)$$

II. stupeň

$$k_{II} = C_o \cdot \sqrt{w} \cdot C_{tv1} \cdot C_m \cdot C_\varepsilon \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (33)$$

$$C_{tv1} = 1,42 \cdot 10^{-2} \cdot 23,72 - 2,06 \cdot 10^{-3} \cdot (|23,72 - 18,5|)^{1,42} + 0,705 = 1,02 \quad (34)$$

$$k_{II} = 2705 \cdot \sqrt{2,5} \cdot 1,02 \cdot 0,86 \cdot 1 = 3751,767 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (35)$$

Výpočet velikosti teplosměnné plochy

$$Q = k \cdot \Delta t_{STR} \cdot S \quad (36)$$

$$S = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_{STR}} \quad m^2 \quad (37)$$

Předané teplo v jednom stupni

$$Q_{I,II} = \frac{Q}{2} = \frac{2,134 \cdot 10^9}{2} = 1,067 \cdot 10^9 \quad W \quad (38)$$

Střední logaritmický rozdíl teplot:

I. stupeň

$$\Delta t_{STR-I} = \frac{\Delta t_{1-I} + \Delta t_{2-I}}{\ln \frac{\Delta t_{1-I}}{\Delta t_{2-I}}} = \frac{8,68 - 3}{\ln \frac{8,68}{3}} = 5,346 \quad ^\circ C \quad (39)$$

II. stupeň

$$\Delta t_{STR-II} = \frac{\Delta t_{1-II} + \Delta t_{2-II}}{\ln \frac{\Delta t_{1-II}}{\Delta t_{2-II}}} = \frac{8,68 - 3}{\ln \frac{8,68}{3}} = 5,346 \quad ^\circ C \quad (40)$$

Velikost teplosměnné plochy

I. stupeň

$$S_I = \frac{Q_I}{k_I \cdot \Delta t_{STR-I}} = \frac{1,067 \cdot 10^9}{3531,075 \cdot 5,346} = 56523 \quad m^2 \quad (41)$$

II. stupeň

$$S_{II} = \frac{Q_{II}}{k_{II} \cdot \Delta t_{STR-II}} = \frac{1,067 \cdot 10^9}{3751,767 \cdot 5,346} = 53199 \quad m^2 \quad (42)$$

Z uspořádání vyplývajícího z konstrukčních důvodů se dělají obě teplosměnné plochy shodné.

$$S_I = S_{II} \Rightarrow \text{zvětšení teplosměnné plochy } S_{II}$$

Pro stanovení skutečné teplosměnné plochy musí být známo: průřez trubky, délka trubky a počet trubek.

Průřez trubky se vypočítá

$$S_{pt} = \pi \cdot r^2 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,024^2}{4} = 4,524 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (43)$$

Počet trubek

$$n = \frac{\dot{m}_v}{\rho_v \cdot w \cdot S_{pt}} = \frac{44469,375}{1000 \cdot 2,5 \cdot 4,524 \cdot 10^{-4}} = 39319 \quad (44)$$

Kondenzátor je dvoukomorový, proto je počet trubek zaokrouhlen na sudý počet

$$n = 39320$$

Délka trubky (v parním prostoru), komory kondenzátoru jsou shodné, tedy délka $l_p = l_{pI} = l_{pII}$.

$$l_p = \frac{S_I}{\pi \cdot d_2 \cdot n} = \frac{56523}{\pi \cdot 0,025 \cdot 39320} = 18,303 \text{ m} \quad (45)$$

Trubkovnice má tloušťku 40mm a trubka ji přesahuje o 3mm (pro zaválcování). Pro snadnější realizaci a s ohledem na zkrácenou teplosměnnou plochu (zaválcování do trubkovnic) je zvolena výsledná délka trubky $l_{pk} = 18,39 \text{ m}$.

Tedy skutečná délka trubky v parním prostoru l_{ps}

$$l_{ps} = l_{pk} - (2 \cdot (0,04 + 0,003)) = 18,39 - 0,086 = 18,304 \text{ m} \quad (46)$$

Skutečná teplosměnná plocha se vypočítá

$$S_{skut} = 2 \cdot S_{I-skut} = 2 \cdot \pi \cdot d_2 \cdot l_{ps} \cdot n = 2 \cdot \pi \cdot 0,025 \cdot 18,304 \cdot 39320 = 113052,3 \text{ m}^2 \quad (47)$$

3.2 Upřesněný výpočet kondenzačních teplot

Výchozí rovnice tepelné bilance

$$\dot{m}_{pk} \cdot (i_x \cdot c_{p1} \cdot t_k) = \dot{m}_v \cdot c_{p2} \cdot (t_{v2} - t_{v1}) \quad (48)$$

Kde jsou neznámé t_{v2} a t_k , k řešení se dospěje přes

$$Q = k \cdot \Delta t_{STR} \cdot S \quad (49)$$

$$\Delta t_{STR} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (50)$$

A platí

$$\dot{Q} = \dot{m}_v \cdot c_p \cdot (t_{v2} - t_{v1}) = \dot{m}_v \cdot c_{p2} \cdot (\Delta t_1 - \Delta t_2) \quad (51)$$

Spojením rovnic (49), (50), (51) dostaneme

$$\ln \frac{t_k - t_{v1}}{t_k - t_{v2}} = \frac{t_k - t_{v1}}{t_k - t_{v2}} \quad (52)$$

\Rightarrow

$$e^{\frac{S \cdot k}{c_p \cdot \dot{m}_v}} = \frac{t_k - t_{v1}}{t_k - t_{v2}} \quad (53)$$

Řešením rovnic (48) a (53) \Rightarrow teplota kondenzující páry

$$t_k = \frac{a \cdot (t_{v1} + \frac{b \cdot i_x}{c_p}) - t_{v1}}{a \cdot (1 + b) - 1} \text{ } ^\circ C \quad (54)$$

$$a = e^{\frac{S \cdot k}{c_p \cdot \dot{m}_v}} \quad (55)$$

$$b = \frac{\dot{m}_{pk}}{\dot{m}_v} \quad (56)$$

Teplota na výstupu z kondenzátoru

$$t_{v2} = \frac{b \cdot (i_x - c_p \cdot t_k)}{c_p} + t_{v1} \text{ } ^\circ C \quad (57)$$

I. stupeň

$$a_I = \exp\left(\frac{S_I \cdot k_I}{c_p \cdot \dot{m}_v}\right) = \exp\left(\frac{56523 \cdot 3531,075}{4187 \cdot 44469,375}\right) = 2,921 \quad (58)$$

$$b_I = \frac{\dot{m}_{pk1}}{\dot{m}_v} = \frac{240,375}{44469,375} = 0,005 \quad (59)$$

Kondenzační teplota prvního stupně

$$t_k = \frac{a_I \cdot (t_{v1} + \frac{b_I \cdot i_x}{c_p}) - t_{v1}}{a_I \cdot (1 + b_I) - 1} = \frac{2,921 \cdot \left(18,04 + \frac{0,005 \cdot 2330,8}{4,187}\right) - 18,04}{2,921 \cdot (1 + 0,005) - 1} = 22,104 \text{ } ^\circ C \quad (60)$$

Výstupní teplota chladící vody z prvního stupně

$$t_{v1-II} = \frac{b \cdot (i_x - c_p \cdot t_k)}{c_p} + t_{v1} = \frac{0,005 \cdot (2330,8 - 4,187 \cdot 22,104)}{4,187} + 18,04 = 20,713 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (61)$$

II. stupeň

$$a_{II} = \exp\left(\frac{S_{II} \cdot k_{II}}{c_p \cdot \dot{m}_v}\right) = \exp\left(\frac{56523 \cdot 3751,767}{4187 \cdot 44469,375}\right) = 3,123 \quad (62)$$

$$b_{II} = \frac{\dot{m}_{pk1}}{\dot{m}_v} = \frac{240,375}{44469,375} = 0,005 \quad (63)$$

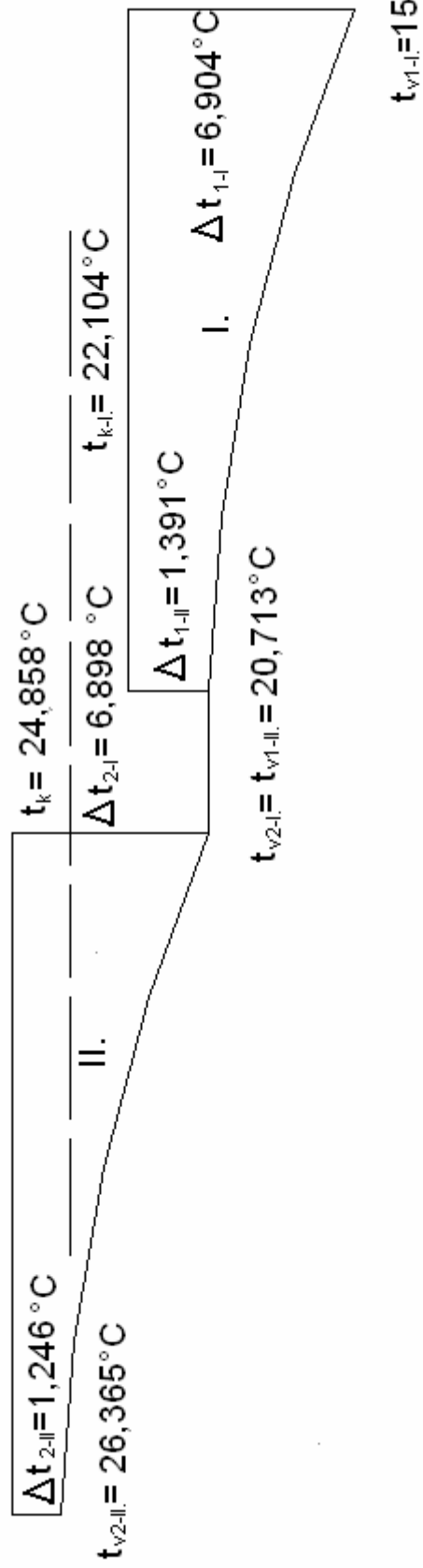
Kondenzační teplota druhého stupně

$$t_{kII} = \frac{a_{II} \cdot (t_{v2} + \frac{b_{II} \cdot i_x}{c_p}) - t_{v2}}{a_{II} \cdot (1 + b_{II}) - 1} = \frac{3,123 \cdot \left(23,72 + \frac{0,005 \cdot 2330,8}{4,187}\right) - 23,72}{3,123 \cdot (1 + 0,005) - 1} = 27,611 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (64)$$

Výstupní teplota chladící vody z druhého stupně

$$t_{v2-II} = \frac{b_{II} \cdot (i_x - c_p \cdot t_k)}{c_p} + t_{v2} = \frac{0,005 \cdot (2330,8 - 4,187 \cdot 27,611)}{4,187} + 23,72 = 26,365 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (65)$$

$$t_{k-II} = 27,611^{\circ}\text{C}$$



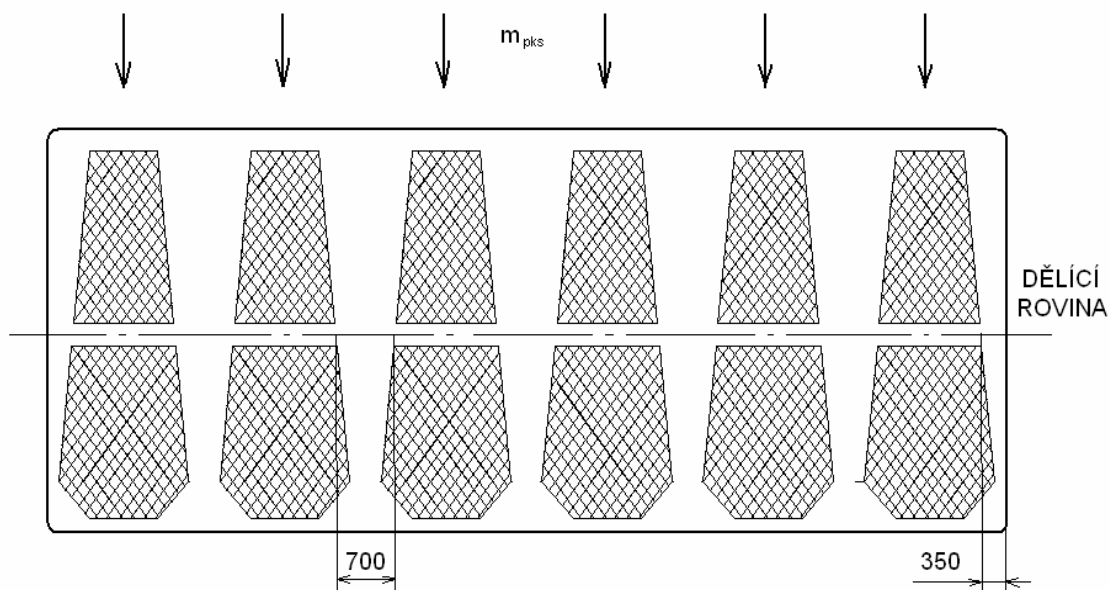
SKUTEČNÝ PRŮBĚH TEPLIT

Obr.16

4. Celkové dispoziční uspořádání kondenzátoru

Uspořádání teplosměnných trubek

Uspořádání teplosměnných trubek v obou komorách kondenzátoru je shodné. Trubky jsou uspořádány do šesti svazků, které jsou odděleny mezerami. Pára proudící shora mezitrubkovým prostorem kondenzuje a kondenzát stéká do sběrače kondenzátu. Odkud je čerpán kondenzačními čerpadly a přes nízkotlaký ohřívací systém a odplynovák dopravován do napájecí nádrže.



Uspořádání svazků trubek

Obr.17

Výpočet počtu svazků p_s

$$p_s = \frac{n_c}{n_{sv}} \quad (66)$$

n_c celkový počet trubek v jednom stupni kondenzátoru

n_{sv} počet trubek ve svazku

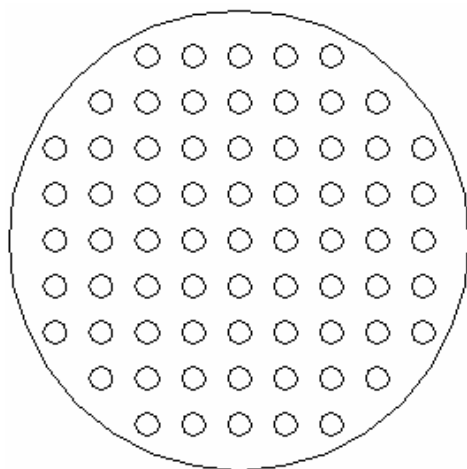
Vzájemná poloha trubek ovlivňuje součinitel přestupu tepla. Kde vzniká problém s odvodem kondenzátu, který stéká na nižší trubky a vytváří na nich izolační vrstvu kondenzátu viz Obr.15 . Uspořádání trubek také ovlivňuje tlakové ztráty v kondenzátoru. Pro kondenzátor řešený v diplomové práci bylo zvoleno uspořádání střídavé viz. Obr. 19.

Rozteč mezi trubkami

$$t = \frac{9}{8} \cdot d + 5 = \frac{9}{8} \cdot 25 + 5 = 33,125 \text{ mm} \quad (67)$$

Tato hodnota byla zaokrouhlena na $t = 34 \text{ mm}$

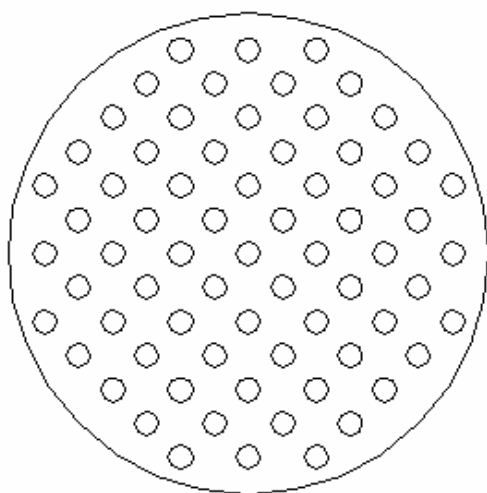
Typy uspořádání, které se běžně používají:



Obr. 18

Uložení za sebou viz. Obr.18

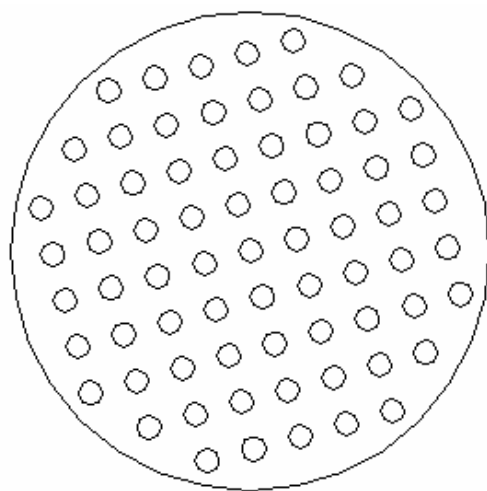
Toto uložení má výhody v malém odporu při průchodu páry, což je kompenzováno zhoršeným přestupem tepla. To je také zapříčiněno stékajícím kondenzátem z výš položených trubek.



Obr.19

Střídavé uložení viz. Obr. 19

Toto uložení má větší hodnotu odporu při průchodu páry než uložení za sebou, ale vykazuje lepší hodnoty přestupu tepla. Dráha páry není přímá. Stejný problém se stékajícím kondenzátem z výš položených trubek jako u uložení za sebou.



Obr.20

Uložení Ginabat viz Obr.20

Toto uložení vychází ze střídavého uložení, které je pootočeno o úhel φ . Problém stékajícího kondenzátu je částečně eliminován střídavým uložení, kde dochází ke stékání kondenzátu na níže položenou trubku, ale smáčená plocha se podstatně zmenší. Úhel φ se obvykle volí $\varphi = 10 - 15^\circ$.

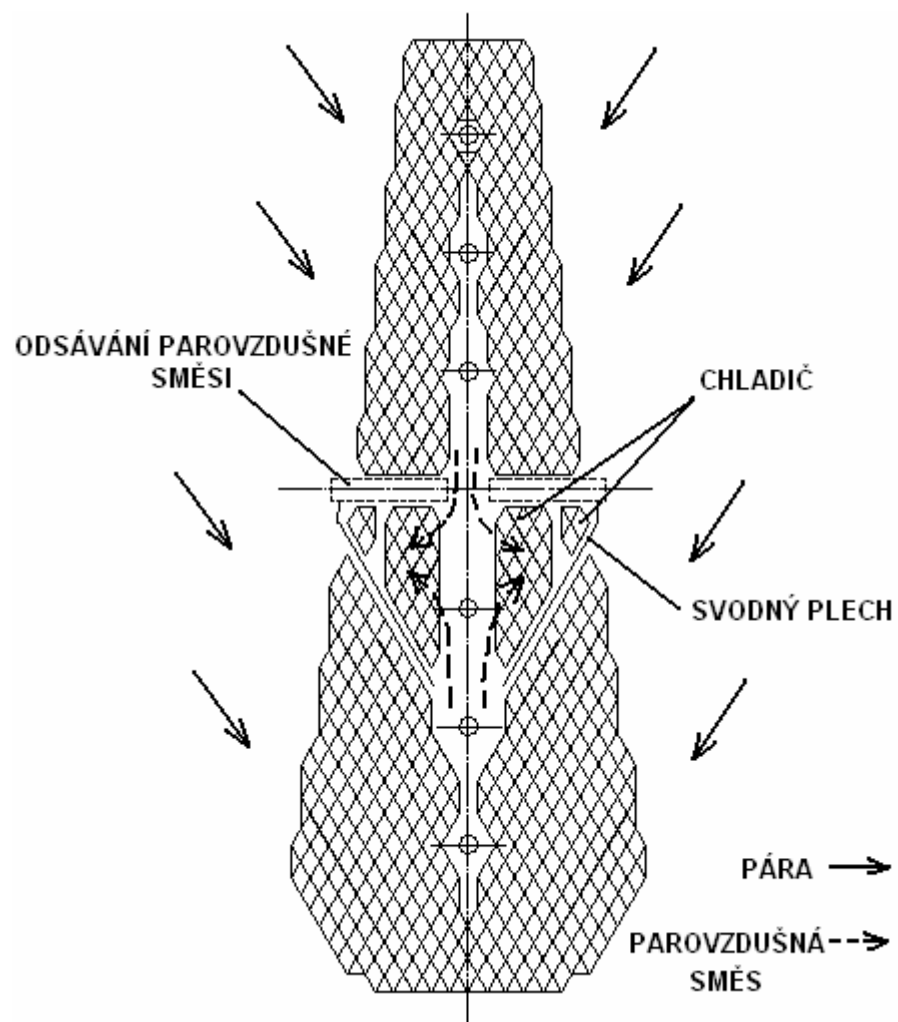
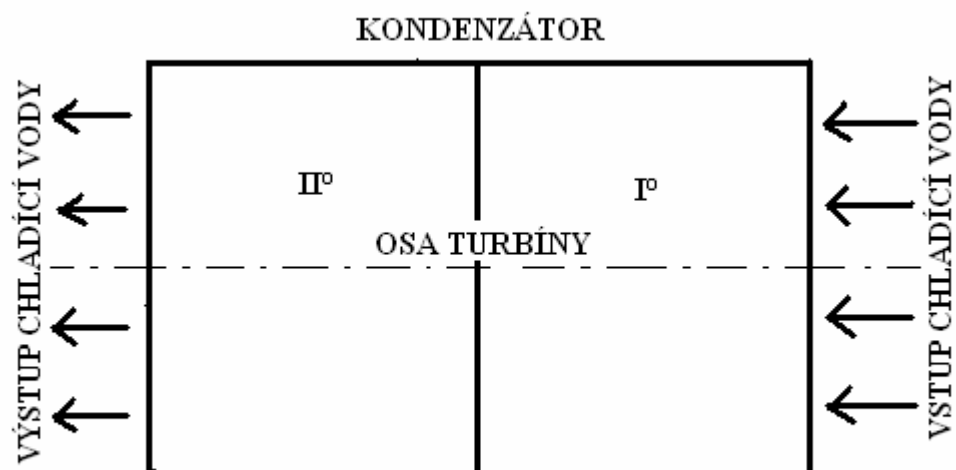


Schéma svazku trubek s vyznačeným prouděním
obr. 21

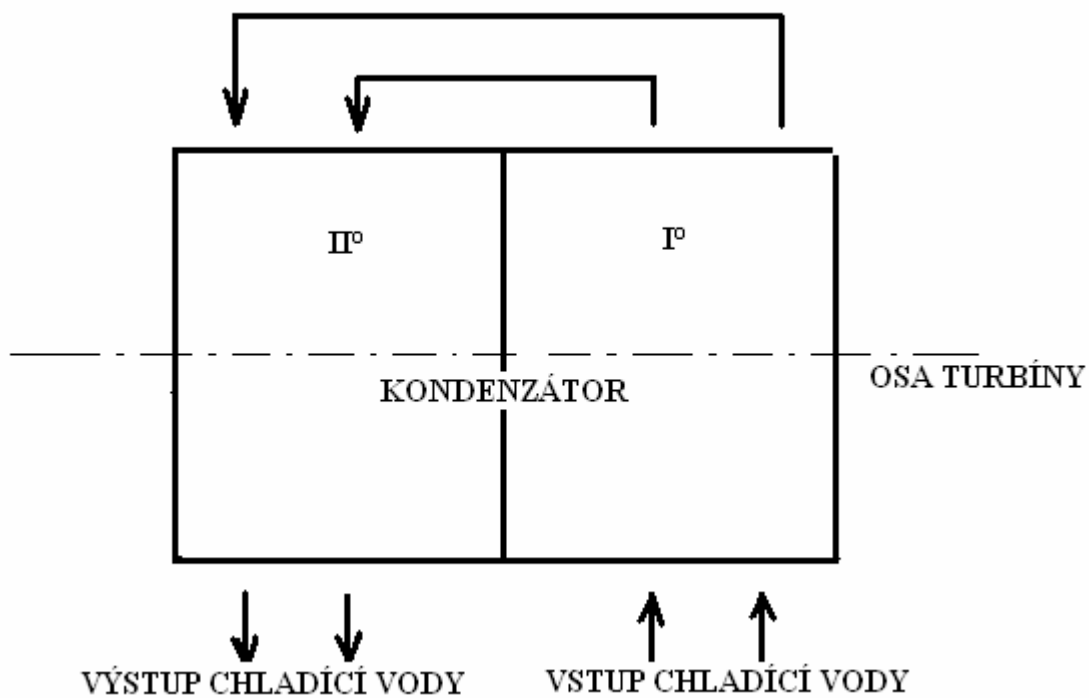
Uložení kondenzátoru

Kondenzátor je možné uložit dvěma způsoby.

- Podélné uložení
má shodný směr vstupu chladicí vody s osou turbíny
- Příčné uložení
má kolmý směr vstupu chladicí vody s osou turbíny



Podélné uložení kondenzátoru
Obr.22



Příčné uložení kondenzátoru
Obr.23

5. Hydraulický výpočet kondenzátoru

Na okruhu chladicí vody se uvádí, že tlaková ztráta v kondenzátoru je asi 30 % všech ztrát okruhu chladicí vody.

Tlaková ztráta ve svazku trubek

$$h_{z,sv} = \left(\lambda \cdot \frac{z \cdot l}{d_i} + \sum \xi \right) \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho_v \quad Pa \quad (68)$$

$\sum \xi$ součet místních ztrát pro jednoranový kondenzátor $\sum \xi = 1,5$ [5]

Součinitel tření dle Altšula

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{k}{d_i} + \frac{68}{Re_l} \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left(\frac{0,002}{24} + \frac{68}{55556} \right)^{0,25} = 0,021 \quad (69)$$

$$k = 0,002 \text{ mm} \quad [7]$$

Tlaková ztráta pro první a druhý stupeň

$$h_{z,sv} = \left(\lambda \cdot \frac{z \cdot l}{d_i} + \sum \xi \right) \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho_v = (0,021 \cdot \frac{1 \cdot 18,39}{0,024} + 1,5) \cdot \frac{2,5^2}{2} \cdot 1000 = 54972,656 \text{ Pa} \quad (70)$$

Tlaková ztráta v komorách

Tlaková ztráta v komorách je popsána vztahem:

$$h_{z,k} = \xi \cdot \frac{w_h^2}{2} \cdot \rho_v \quad Pa \quad (71)$$

w_h rychlost v hrdle $m \cdot s^{-1}$

Ze vztahu pro hmotnostní tok se vypočte rychlost v hrdle

$$\dot{m}_v = \frac{\pi \cdot d_h^2}{4} \cdot w_h \cdot n \cdot \rho_v \quad kg \cdot s^{-1} \quad (72)$$

d_h průměr hrdla m

n počet hrdel

$$w_h = \frac{4 \cdot \dot{m}_v}{\pi \cdot d_h^2 \cdot n \cdot \rho_v} \quad m \cdot s^{-1} \quad (73)$$

$$d_h = 2,4 \text{ m} \quad [8]$$

$$n = 4$$

$$w_h = \frac{4 \cdot \dot{m}_v}{\pi \cdot d_h^2 \cdot n \cdot \rho_v} \quad w_h = \frac{4 \cdot 44469,375}{\pi \cdot 2,4^2 \cdot 4 \cdot 1000} = 2,457 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Tlaková ztráta v komorách

$$h_{z,k} = \xi \cdot \frac{w_h^2}{2} \cdot \rho_v = 1,5 \cdot \frac{2,3^2}{2} \cdot 1000 = 3967,5 \text{ Pa} \quad (74)$$

Celková tlaková ztráta na vodní straně kondenzátoru

Dvoustupňový kondenzátor

$$h_{z,c} = 2 \cdot (h_{z,sv} + h_{z,k}) = 2 \cdot (54972,656 + 3967,5) = 117879,31 \text{ Pa} \quad (75)$$

Kontrola rychlosti páry mezi svazky trubek

Neměla by překročit $w = 150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [5]

Počet svazků trubek $n_s = 6$

Počet mezer mezi svazky $n_m = 6$

Měrný objem páry $v_x = 28,3$

Množství páry vstupující do stupně $\dot{m}_{pks} = 1730,7 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} \Rightarrow \dot{m}_{pks} = 480,75 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Předpoklad je, že před průchodem páry dělicí rovinou zkondenzuje poloviční množství páry, z důvodu přibližné poloviny počtu trubek.

Zbývá tedy zkondenzovat:

$$\frac{\dot{m}_{pks}}{2} = \frac{480,75}{2} = 240,375 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (76)$$

Na jednu mezeru mezi svazky připadá množství páry

$$\dot{m}_{pk,sv} = \frac{\frac{\dot{m}_{pks}}{2}}{6} = \frac{240,375}{6} = 40,063 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (77)$$

Mezera má tyto rozměry (rozměry jsou udávány v dělicí rovině)

Délka $l = 18,303 \text{ m}$

Šířka $b = 0,7 \text{ m}$

Průtočná plocha mezery

$$S = b \cdot l = 0,7 \cdot 18,303 = 12,812 \text{ m}^2 \quad (78)$$

Rychlost páry mezerou

$$w = \frac{\dot{m}_{pk,sv} \cdot v_x}{S} = \frac{40,063 \cdot 28,3}{12,812} = 88,494 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (79)$$

Rychlost páry je vyhovující a splňuje $w < 150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

6. Pevnostní výpočet teplosměnných trubek

Napětí stěny v podélném osovém řezu pro malou tloušťku stěny [9]

$$\sigma_t = \frac{d_i \cdot \Delta p}{20 \cdot S} \text{ Pa} \quad (80)$$

Δp přetlak vody proti páře Pa

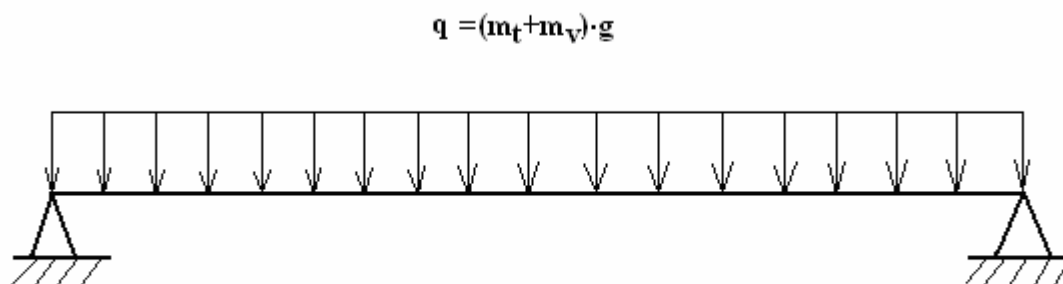
$\Delta p = 3 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ pro trubku $d_i = 24 \text{ mm}$ a $s = 0,5 \text{ mm}$

$$\sigma_t = \frac{d_i \cdot \Delta p}{20 \cdot S} = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot 24}{20 \cdot 0,5} = 7,2 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (81)$$

Vzhledem k nepoměrně většímu zkušebnímu tlaku (7 MPa) není trubky nutné počítat na vnitřní přetlak.

Kontrola namáhání trubky ohybem

Trubka je uvažována jako nosník viz. obr.24 zatížena vlastní hmotností a hmotností vody uvnitř trubky.



Uvažované zatížení trubky
Obr.24

Maximální tahové napětí v ohybu

$$\sigma_0 = \frac{M_0}{W_0} \quad (82)$$

$$\sigma_0 = \frac{F \cdot l}{8 \cdot W_0} \text{ Pa} \quad (83)$$

l délka trubky mezi podporami (trubkovnicemi)

Celkové zatížení

$$F = \frac{\pi \cdot l}{4} \cdot \left[(d_2^2 - d_1^2) \cdot \rho_m + d_1^2 \cdot \rho_v \right] \cdot g \quad N \quad (84)$$

ρ_m měrná hmotnost materiálu trubky

Titan $\rho_m = 4497 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ [10]

Průřezový modul v ohybu trubky

$$W_0 = \frac{\pi}{32} \cdot \left(\frac{d_2^4 - d_1^4}{d_2} \right) \text{ m}^3 \quad (85)$$

Spojením rovnic (83), (84) a (85) získáme

$$\sigma_0 = \frac{d_2 \cdot l^2 \cdot \left[(d_2^2 - d_1^2) \cdot \rho_m + d_1^2 \cdot \rho_v \right] \cdot g}{d_2^4 - d_1^4} \text{ Pa} \quad (86)$$

$$\sigma_0 = \frac{0,025 \cdot 18,303^2 \cdot \left[(0,025^2 - 0,024^2) \cdot 4497 + 0,024^2 \cdot 1000 \right] \cdot 9,81}{0,025^4 - 0,024^4} = 6,543 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

Maximální průhyb trubky

$$\omega = \frac{5}{384} \cdot \frac{F \cdot l^3}{E \cdot J} \text{ m} \quad (87)$$

Kvadratický osový moment trubky

$$J = \frac{\pi}{64} \cdot (d_2^4 - d_1^4) \text{ m}^4 \quad (88)$$

Spojením rovnic (84), (87) a (88)

$$\omega = \frac{5}{24} \cdot \frac{l^4 \cdot \left[(d_2^2 - d_1^2) \cdot \rho_m + d_1^2 \cdot \rho_v \right] \cdot g}{E \cdot (d_2^4 - d_1^4)} \text{ m} \quad (89)$$

$$\omega = \frac{5}{24} \cdot \frac{18,303^4 \cdot [(0,025^2 - 0,024^2) \cdot 4497 + 0,024^2 \cdot 1000] \cdot 9,81}{118,7 \cdot 10^9 \cdot (0,025^2 - 0,024^2)} = \frac{5}{24} \cdot \frac{87625,72}{5816300} 0,003 \text{ m}$$

Podle literatury [9] je dovolený průhyb $\omega = 2 - 2,5 \text{ mm}$

Z tohoto důvodu je třeba vložit do kondenzátoru mezitrubkovnice, které zabrání nedovolenému průhybu.

7. Závěr

Pro turbínu jaderné elektrárny o výkonu 1200 MWe nové generace III+ byl navrhnut dvoustupňový kondenzátor o těchto parametrech pro chladicí vodu:

t_{v1-l}	15,2	$^{\circ}\text{C}$
\dot{m}_v	160 089,75	$\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$

Kondenzátor je rozdělen do dvou stupňů a v každém stupni je šest svazků trubek. Trubky jsou zaválcované do trubkovnic s přesahem pro zaválcování 3 mm. Jako materiál trubek je navrhnut titan, který se u jaderných elektráren osvědčil. Díky použitému materiálu trubek bylo možné zvýšit (oproti běžně užívaným mosazným trubkám) rychlost chladicí vody bez obav z rázové koroze. Rychlost chladicí vody je navržena na $w = 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Parametry teplosměnné plochy jsou následující:

Celkový počet trubek	39 320
Počet trubek v jednom stupni	19 660
Délka trubky	18,39m
Průměr trubky	25mm
Tloušťka stěny trubky	0,5mm

Literatura

- [1] EGU Brno, ERÚ <http://www.cez.cz/edee/content/file/o-spolecnosti/cisla-statistiky/dlouhodoby-vyvoj-cr.gif>
- [2] Atomstroyexport Atomstroyexport_03_SPbAEP_NPP-2006
- [3] ŠKODA POWER <http://www.skoda.cz/skoda-holding/products/c31692/skoda-heat-exchangers-aid630.html>
- [4] Píkhart J. Základy metodiky výpočtu výměníků tepla, STNL, Praha 1975
- [5] Mičík P. Návrh kondenzátoru pro parní turbínu o výkonu 1000 MW pro jadernou elektrárnu
- [6] HEI Heat Exchange Institute Standart, Cleveland 1978
- [7] Bálek S. Tepelně technické tabulky a diagramy VŠB, Ostrava 1984
- [8] Leinveber J., Vávra P. Strojnické tabulky Albra, Úvaly 2003
- [9] Šindelář K. Kondenzace SNTL, Praha 1958
- [10] Klabík V. Výzkum vlastností titanu a jeho slitin SVÚMT, Praha 1961